

Futtermittel im Nah-Infrarotlicht (NIRS)

Silvia Ampuero Kragten und Ueli Wyss

Agroscope, Institut für Nutztierwissenschaften INT, 1725 Posieux, Schweiz

Auskünfte: Silvia Ampuero Kragten, E-Mail: silvia.ampuero@agroscope.admin.ch



Abb. 1 | Futterproben (von links nach rechts und von oben nach unten): Maisganzpflanzen vor der Silierung, Maissilage, Heu, lyophilisiertes Gras, Grassilage.

Einleitung

Weniger als zwei Minuten genügen, um die Messschale mit einer Futterprobe zu befüllen, im Gerät zu platzieren, die Messung durchzuführen und als Resultat die chemische Zusammensetzung der Probe zu erhalten, was ungefähr zehn Parametern entspricht. Der entscheidende Vorteil der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) liegt in der hohen Messgeschwindigkeit und den folglich sehr geringen Kosten.

Als Folge der grossen Nachfrage nach einer schnellen und quantitativen Technik für die Bestimmung der Feuchte-, Protein- und Fettgehalte im Weizen tauchte diese Technologie bereits Mitte des 20. Jahrhunderts auf (Hindle 2001). 1933 ermöglichten die Arbeiten von Kubelka und Munk über die Lichtstreuung in Transmission und Refraktion die Analyse von Feststoffproben

mit NIRS (Hindle 2001). Ende der sechziger Jahre veröffentlichte Arbeiten zeigen, dass das Fortschreiten der Chemometrie und der Durchbruch der Computertechnologie Karl Norris vom amerikanischen Landwirtschaftsdepartement die Entwicklung von Kalibrierungen durch multiple lineare Regression (MLR) für landwirtschaftliche Produkte ermöglichte. Die NIRS wird heute in erster Linie als Mittel zur Qualitäts- und Prozesskontrolle im industriellen Sektor von Pharma und Chemie, in der Petrochemie und in der Nahrungsmittelindustrie intensiv genutzt.

Eine regelmässige Kontrolle der chemischen Zusammensetzung sowie der Qualität von Futtermitteln in landwirtschaftlichen Betrieben ist bei der Planung und Berechnung von Tierfuttermitteln unerlässlich. Hauptziel ist es, ausgeglichene Rationen zu erstellen, welche die Tiergesundheit erhalten, zu Gunsten der Umwelt Überschüsse und Verschwendung vermeiden und schlussendlich die rentable Produktion von Milch und Fleisch ermöglichen.

Mit der NIRS lassen sich die klassischen Methoden zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mit einem beträchtlichen Zeitgewinn (jede klassische Analyse benötigt 3 bis 15 Stunden Zeit) und ohne Reagenzien und chemische Abfälle günstig ersetzen. Die NIRS ist allerdings stark abhängig von der Referenzdatenbank; sowohl von der Qualität der Referenzanalysen als auch von der Repräsentation der bei den künftigen Proben zu erwartenden Diversität. Zudem liegt es in der Natur der NIRS, dass die Kalibrierungsmodelle dem für die Kalibrierung verwendeten Probentyp fest zugeordnet sind. Folglich ist eine Referenzdatenbank mit einer hohen Anzahl von Proben für jeden Matrixtyp notwendig, die mit der Referenzmethode analysiert wurden und die gesamte erwartete Bandbreite an Proben abdecken, die mit NIRS analysiert werden sollen (Workman 2001).

Ziel dieses Artikels ist es, die Vor- und Nachteile der Nahinfrarotspektroskopie zusammenzufassen, und zwar im Hinblick auf ihre Anwendung bei der Analyse der chemischen Zusammensetzung von Futtermitteln anhand von Anwendungsbeispielen, die am INT entwickelt wurden.



Abb. 2 | Heuballen mit sichtlichen Spuren der erfolgten Probebohrungen.

Material und Methode

Die Referenzdatenbank

Seit 2005 werden Spektren von Raufutterproben aus der ganzen Schweiz gesammelt. Die Proben mit einem Feuchtegehalt von $\geq 13\%$ wurden entweder im Ofen ca. 15 h bei 60°C getrocknet oder lyophilisiert. Alle Proben wurden anschliessend mit einer Brabender Messermühle mit 1 mm Sieb gemahlen. Die Raufutterproben wurden vier Gruppen zugeordnet. Abbildung 1: I) **Gr-H**: Gras und Heu; sowohl bei 60°C im Ofen getrocknetes oder lyophilisiertes Gras als auch Heu. II) **Gr-Sil**: Grassilage. III) **M-frisch**: Maisganzpflanzen vor der Silierung, bei 60°C im Ofen getrocknet. IV) **M-Sil**: Maissilage. Momentan befinden sich zwischen 100 und 780 Proben pro Gruppe in der jeweiligen Datenbank (400–2600 Spektren). Ausserdem wurde eine Serie von zehn Proben durch Probebohrungen in zehn unterschiedlichen Heuballen genommen (Abb. 2). Die elfte Probe ist eine Mischprobe aus den zehn Einzelproben. In Tabelle 1 werden die verwendeten Referenzanalysen dargestellt.

Das NIRS-Gerät

Die Analysen wurden mit einem Laborgerät, NIRFlex N-500 FT-NIR Spektrometer der Büchi Labortechnik AG (Flawil, Schweiz) durchgeführt. Die Messung der NIR-Spektren in diffuser Reflexion erfolgte im Spektralbe-

Zusammenfassung Die Verwendung der Nahinfrarotspektroskopie (NIRS) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Futtermitteln wird mit Hilfe von Schätzmodellen dargestellt, welche am Institut für Nutztierwissenschaften INT von Agroscope entwickelt wurden. Angewendet wurden geläufige Werte für den Koeffizienten $R^2 > 0,96$ bei Parametern wie Trockensubstanz (TS), Rohprotein (RP), Lignocellulose (ADForg), Zellwände (NDForg), Rohfaser (RF), Asche (RA), Fett (RL), Zucker und Stärke in Heu und Gras, in Grassilage, in Maisganzpflanzen vor der Silierung sowie in Maissilage. Die Analyse von Einzelproben mit NIRS ist gegenüber einer gepoolten Mischprobe, die chemisch analysiert wird, vorteilhaft, da man auf diese Weise der Besonderheit jeder einzelnen Probe gerecht werden kann.

reich von 1000 bis 2500 nm ($10\,000$ bis 4000 cm^{-1}) mit einer Auflösung von 8 cm^{-1} . Das Gerät ist mit einer speziellen Messschale mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 4 cm ausgestattet. Der NIR Lichtstrahl fällt aus einem Fenster von 2,2 cm Durchmesser (Abb. 3). Jeder Wert ist ein Mittelwert aus 32 Spektren, welche beim Scannen der um sich selbst rotierenden Messschale jeweils pro Drittel einer Runde gemessen werden. So lassen sich pro Probe während einer vollständigen Rotation der Messschale drei Wiederholungen durchführen. Das Scannen einer so grossen Oberfläche ist bei inhomogenen Proben von Vorteil.



Abb. 3 | NIRS-Analyse mit einem FT-NIR-Gerät.

Tab. 1 | Für die NIRS Modelle verwendete Referenzanalysen

Parameter	Beschreibung der Analysemethode	Referenz
TS	Ofentrocknung bei 105° C bis zu konstanter Masse (2:40 h)	Basiert auf ISO 6496:1999
RP	Kjeldahl oder Dumas (N x 6,25)	Basiert auf ISO 5983-1:2005 und 16634-1
ADForg	Aufschluss einer sauren Detergenz mit Korrektur für Asche (Ankom)	VDLUFA 6.5.2, Bemerkung 8
NDForg	Aufschluss einer neutralen Detergenz mit Korrektur für Asche (Ankom)	AOAC 2002.04; ISO 16472:2006
RF	Aufschluss einer sauren und anschliessend einer alkalischen Detergenz mit Korrektur für Asche (Ankom)	Basiert auf AOAC 978.10; ISO 6865:2000
RA	Nach Bestimmung der TS, Veraschung bei 550° C bis zu konstanter Masse	Basiert auf ISO 5984:2002
RL	Extraktion mit Petrolether nach saurer Hydrolyse	Basiert auf ISO 6492:1999
Zucker	In 80-prozentigem Ethanol lösliche Zucker (Auto Analyser Bran & Luebbe)	Interne Methode
Stärke	Polarimetrie	ISO 6493:2000

Die chemometrischen Modelle wurden mit der Software NIRCal® der Büchi Labortechnik AG (Flawil, Suisse) entwickelt. Diese quantitativen Schätzmodelle verwenden den Algorithmus der Regression mit partiellen kleinsten Quadraten (PLS) begleitet von diversen mathematischen Vorbehandlungen, wie zum Beispiel ncl (normalisation by closure), nle (normalisation to unit length), msc full (multiplicative scatter correction), snv (standard normal variate), db1 (1st derivative BCAP 5 points), dg1 (1st derivative Savitsky Golay 9 points), dt1 (1st derivative Taylor 3 points). Jedes Mal wurden mindestens zwei Drittel der verfügbaren Proben für die Kalibrierung verwendet; das restliche Drittel wurde für eine unabhängige Validierung genutzt.

Resultate und Diskussion

Betrachtung von Futtermitteln mit NIRS

Das Expertenauge unterscheidet ohne Probleme Heu des ersten Schnitts von dem des zweiten Schnitts, und die Qualität einer Silage lässt sich anhand ihres Geruchs

bewerten. Die NIRS reagiert hingegen auf die Energie, welche durch die Bindungen C-H, O-H, N-H, S-H der Probe absorbiert wird; das bedeutet, durch die Gehalte an Wasser, Kohlenhydraten, Proteinen, Fetten etc. Die NIRS-Spektren folgender Proben werden in Abbildung 4 dargestellt: Gras, Gr-Sil, M-frisch und M-Sil. In dieser Abbildung sind bestimmte charakteristische Spektralbänder der Verbindungen O-H, N-H, S-H und C-H ersichtlich (Shenk *et al.* 2001). Die Spektren dieser verschiedenen Futtermittel sind allesamt recht ähnlich. Man könnte sie mit einer Art digitalem NIRS-Fingerabdruck vergleichen. Die grosse Anzahl an chemischen Bestandteilen in der Probe führt zu einer Überlagerung der Signale und ergibt die charakteristischen Absorptionsbänder des NIRS. Deshalb ist die Chemometrie erforderlich, um schlussendlich Schätzmodelle zu erstellen.

Ausserdem beeinflussen die Mineralstoffe – also Asche – die NIRS Spektren nur dann, wenn sie Bindungen oder Komplexe mit anderen Probenmolekülen eingehen (Roberts *et al.* 2004). So kann man verstehen, dass es schwierig ist, die Rohasche in Raufuttern genau zu schät-

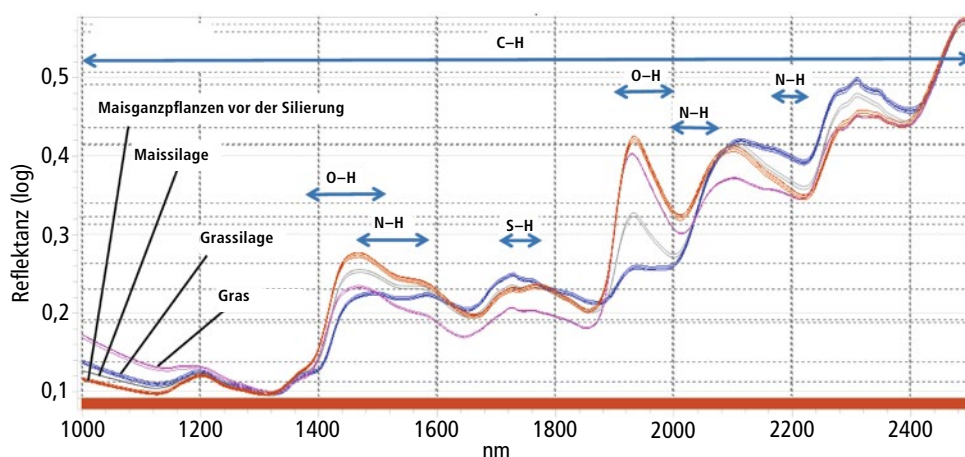


Abb. 4 | GNIRS-Absorptionsspektren folgender Proben: Gras, Grassilage, Maisganzpflanzen vor der Silierung und Maissilage.

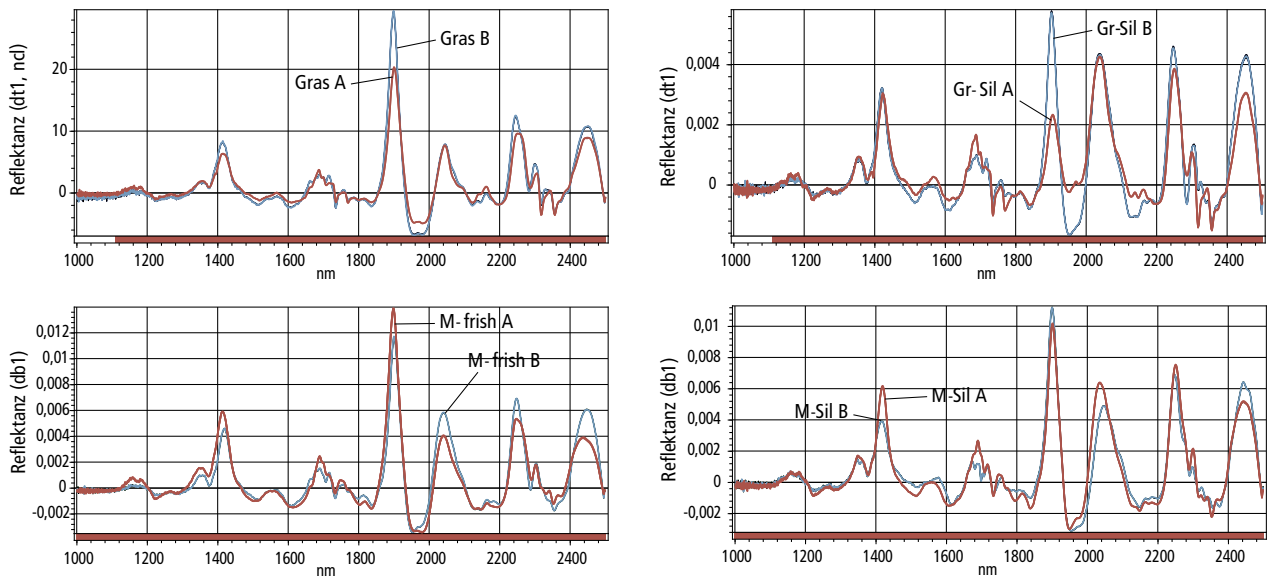


Abb. 5 | NIRS-Spektren nach mathematischer Vorbehandlung von kontrastierenden Proben aus: I) Gras, II) Grassilage, III) Maisganzpflanzen vor der Silierung und IV) Maissilage.

zen, wohingegen es zum Beispiel deutlich einfacher ist, die Rohasche in Getreide zu bestimmen. Dadurch, dass die Raufutterproben mehr oder weniger mit Erdverunreinigungen «kontaminiert» sind, sind bereits die Referenzanalysen mit einem bestimmten Fehler behaftet, und es lässt sich nicht vermeiden, dass sich dieser auch auf die NIRS-Modelle überträgt.

Die relative Bedeutung der Absorptionsbänder der O-H-Verbindungen im Bereich von 1870 bis 1945 nm und 1430 bis 1450 nm wird sowohl in Abbildung 4 (Absorption) als auch in Abbildung 5 (Spektren nach mathematischer Vorbehandlung) sehr deutlich. Folglich ist es leicht zu verstehen, welchen Einfluss die Restfeuchte in der Probe auf die NIRS-Modelle hat, und dass sie die Bestimmung anderer Parameter stören kann (Roberts *et al.* 2004).

Ein anderer Parameter, der die diffuse Reflexion fundamental stört, ist die Granulometrie. Feinere Partikel absorbieren weniger (der vom Licht zurückgelegte Weg ist bei weniger chromophoren Molekülen kürzer) und

reflektieren das Licht stärker. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung der Basislinie, was durch mathematische Prozesse korrigiert werden muss. Diese Besonderheit der NIRS kann auch zur Bestimmung der durchschnittlichen Partikelgrösse verwendet werden.

Die Qualität der NIRS-Schätzmodelle

In den Tabellen 2 bis 5 und in Abbildung 6 werden die Eigenschaften bestimmter NIRS-Kalibrierungen für die am INT verfügbaren Futtermittel dargestellt. Der Determinationskoeffizient $R^2 > 0,9$ (ausser für ADForg bei M-Sil) zeigt die Fähigkeit der NIRS, die chemische Zusammensetzung der Futtermitteln genau zu schätzen. Ebenso widerspiegelt die RPD (ratio of performance deviation, definiert als Fraktion zwischen der Standardabweichung von Referenzwerten und der Standardabweichung der Schätzung, SEP) die Schätzkapazität dieser Modelle, die mit $RPD > 3$ als optimal bezeichnet wird (Heise *et al.* 2005).

Tab. 2 | Eigenschaften der NIRS-Kalibrierungen für die Schätzung der chemischen Zusammensetzung (in g/kg Heu und Gras)

	n	Durchschnitt	Bereich	R^2	SEC	SEP	SEL	RPD
TS	777	937	837–988	0,9938	2,89	2,90	1,36	8,9
RP	748	144	39–264	0,9945	4,56	4,60	1,58	9,4
ADForg	581	258	148–411	0,9835	8,59	8,60	5,48	5,3
NDForg	561	419	183–675	0,9870	12,71	12,75	8,28	6,2
RF	505	218	83–387	0,9891	7,07	6,98	5,49	6,8
RL	167	32	12–68	0,9640	3,05	3,10	2,32	3,7
RA	691	90	39–224	0,9573	6,38	6,38	2,19	3,5

Tab. 3 | Eigenschaften der NIRS-Kalibrierungen für die Schätzung der chemischen Zusammensetzung; (in g/kg TS Grassilage)

	n	Durchschnitt	Bereich	R ²	SEC	SEP	SEL	RPD
TS	321	951	838–985	0,9808	3,90	3,96	1,36	5,1
RP	259	154	41–257	0,9936	4,19	4,30	1,58	8,6
ADForg	156	296	218–425	0,9891	7,11	6,89	5,48	7,0
NDForg	159	448	324–597	0,9895	8,22	7,95	8,28	7,1
RF	243	255	167–357	0,9892	6,18	6,15	5,49	6,9
RA	273	113	55–258	0,9757	6,84	6,24	2,19	5,0

Tab. 4 | Eigenschaften der NIRS-Kalibrierungen für die Schätzung der chemischen Zusammensetzung (in g/kg TS Maisganzpflanzen vor der Silierung)

	n	Durchschnitt	Bereich	R ²	SEC	SEP	SEL	RPD
TS	214	947	864–982	0,9962	1,63	1,57	1,36	12,0
RP	167	75	52–97	0,9799	1,51	1,55	1,58	4,9
ADForg	119	219	88–385	0,6900	5,72	5,89	5,48	6,0
NDForg	143	414	211–637	0,9788	12,53	12,15	8,28	5,1
RF	162	194	65–320	0,9875	5,77	5,68	5,49	6,4
RA	172	34	14–65	0,9724	1,44	1,46	2,19	4,2
Stärke	178	362	69–609	0,9888	12,26	12,23	3,6	6,7

Tab. 5 | Eigenschaften der NIRS-Kalibrierungen für die Schätzung der chemischen Zusammensetzung (in g/kg TS Maissilage)

	n	Durchschnitt	Bereich	R ²	SEC	SEP	SEL	RPD
TS	121	954	894–984	0,9692	4,91	5,23	1,36	4,2
RP	139	74	51–92	0,9612	1,89	2,01	1,58	3,4
ADForg	93	228	180–352	0,9887	4,80	6,02	5,48	5,3
NDForg	93	414	327–577	0,9494	14,60	15,76	8,28	2,9
RF	143	200	151–302	0,9848	4,42	5,20	5,49	4,9
RA	143	36	26–55	0,9582	1,50	1,72	2,19	3,0
Stärke	74	364	129–423	0,9942	5,87	*7,70	3,6	7,1

*: Standardabweichung der Kreuzvalidierung

Die SEP, welche die Abweichung zwischen dem NIRS-Wert und dem chemisch bestimmten Wert beschreibt, kann bei ein und demselben Parameter variieren. So beträgt die SEP für RP 4,6, 4,3, 1,6 und 2,0 g/kg bei den Modellen Gr-H, Gr-Sil, M-frisch und M-Sil. Die Qualität von Schätzmodellen wird in erster Linie durch die Qualität der Referenzanalysen bestimmt; unter anderem jedoch auch durch die Probenanzahl (n) in der Referenzdatenbank. Je grösser n ist, umso grösser wird die SEP sein, und umso robuster können hingegen die Modelle sein.

Die Referenzmethoden für die Bestimmung von Parametern wie ADF_{org} , NDF_{org} etc. weisen eine Unsicherheit auf (hier abgebildet durch die Standardabweichung der Referenzmethode SEL), welche deutlich höher ist als bei anderen Parametern (SEL = 5,5 bzw. 8,3 g/kg für ADF_{org} bzw. NDF_{org}). Dies wird deutlich auf die SEC (Standardabweichung der Kalibrierung) und SEP der NIRS-Kalibrierungen übertragen.

Die Schätzqualität mit NIRS kann durch geringe Gehalte ebenso wie durch einen eingeschränkten Messbereich limitiert werden. Dies ist hier bei RL im Heu der Fall, dennoch weist insbesondere diese NIRS-Kalibrierung eine gute Schätzgenauigkeit auf mit einer $SEP < 1,5 \times SEL$.

Generell beinhaltet der Fehler der NIRS-Schätzung den Fehler der Bestimmung mittels Referenzmethode:

$$\text{Varianz}_{\text{Gerät}}^{\text{NIRS}} = \text{Varianz}_{\text{Ref Meth}} + \text{Varianz}_{\text{Probenahme}} + \text{Varianz}_{\text{andere}}$$

Obwohl der gerätbedingte Fehler angesichts regelmässiger Tests, die mittels strengem Beurteilungsprotokoll der Leistung durchgeführt werden, sehr gering ist, können die durch die Inhomogenität oder die chemische oder physikalische Veränderung der Probe hervorgerufenen Abweichungen beträchtlich sein. Dennoch wird der Fehler der NIRS-Bestimmung weitgehend vom Fehler der analytischen Referenzmethode bestimmt.

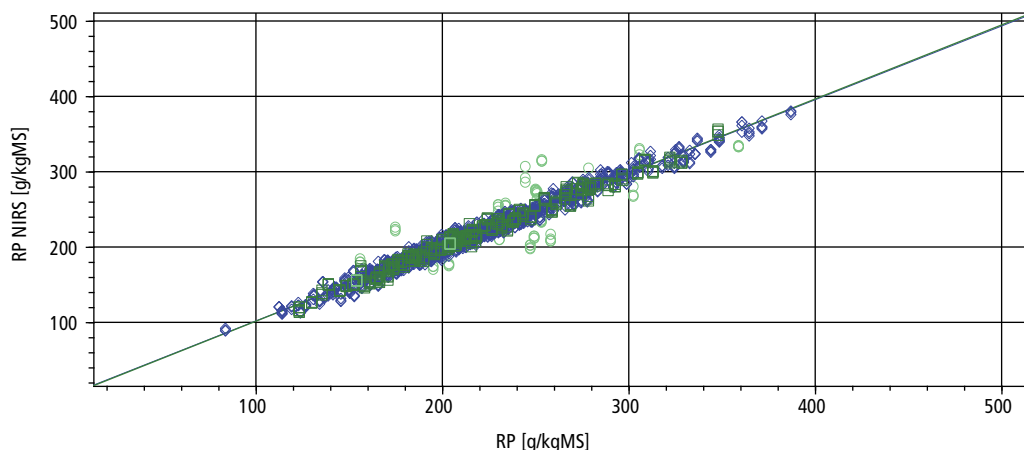


Abb. 6 | Relation zwischen den mit NIRS geschätzten Werten und denjenigen der Referenzmethode für RP in Heu und in Gras. Blaue Rauten: Kalibrierungsproben; Grüne Quadrate: Validierungsproben; Hellgrüne Kreise: Ausreisser.

Eine generell anerkannte empirische Regel besagt, dass eine gute Kalibrierung eine SEP zwischen 1,0 und $1,5 \times \text{SEL}$ aufweist (Mark *et al.* 2003). Aber die höheren SEP Werte können eine bestimmte Heterogenität des physikalischen oder chemischen Zustands der Proben repräsentieren, wie z. B. die Granulometrie, den Restfeuchtegehalt (Vorbereitung der Proben), die Oxidation und andere chemische Reaktionen. Ist eine SEP jedoch kleiner als SEL, so kann dies dadurch bedingt sein, dass die Gesamtmenge der Kalibrierungsproben homogener ist als die Gesamtmenge der für die Bestimmung der SEL bestimmten Proben.

Im Allgemeinen erkennt das System Spektren von Proben, die den Proben der Grundgesamtheit des Kalibriersatzes nicht ähneln. Beispielsweise kann eine Silageprobe, die mit einem Modell für Heu geschätzt wird, als «residual outlier» angegeben werden. Es passiert auch, dass Proben mit grossen Abweichungen zwischen dem geschätzten Wert und dem Referenzwert entdeckt werden. Bevor man diese Werte als Ausreisser verwirft,

kann man in einem solchen Fall versuchen festzustellen, ob sich ein zufälliger Fehler während des Verfahrens eingeschlichen hat: Fehler in der Referenzanalyse, schlechte Probenahme bei der Erfassung des NIR-Spektrums, längliche Partikel in einer gemahlten Probe etc. Es ist empfehlenswert, periodisch neue Referenzproben aufzunehmen, um die Kalibrierung weiter auszubauen, damit die Modelle die gesamte existierende Diversität (sortenbedingt, geografisch, klimatisch, abhängig von der Produktions-, Konservierungs- oder Probenvorbereitungsmethode etc.) beinhalten. Diese Vorgehensweise verbessert bei der von der Matrix abhängigen NIRS die Robustheit der Modelle und ermöglicht es, systematische Abweichungen zu vermeiden.

Einige Parameter stehen in keinem direkten Zusammenhang mit der molekularen Vibrationsenergie, auf welcher die NIRS basiert. Dies ist beispielsweise bei der Verdaulichkeit der organischen Substanz oder der für die Laktation oder die Fleischproduktion zur Verfügung stehende Energie der Fall. Jedoch erlaubt die Korrela- ➤

Tab. 6 | Beispiele für Futterproben mit kontrastierender chemischer Zusammensetzung (A, B), die mit NIRS bestimmt wurden

[g/kg TS]	Futter-A	Futter-B	Gr-Sil-A	Gr-Sil-B	M-frisch-A	M-frisch-B	M-Sil-A	M-Sil-B
TS	931	924	942	968	918	954	968	947
RP	185	124	174	64	84	84	76	80
ADF _{org}	220	418	185	425	154	270	171	329
NDF _{org}	403	589	365	597	316	493	344	547
RF	201	348	177	352	103	265	156	288
RA	99	86	98	64	36	44	29	47
Zucker	127	44	150	114	73	100	6	22
Stärke					398	250	429	197
RL	41	25						

Gr-Sil: Grassilage; M-frisch: Maisganzpflanzen vor der Silierung; M-Sil: Maissilage.

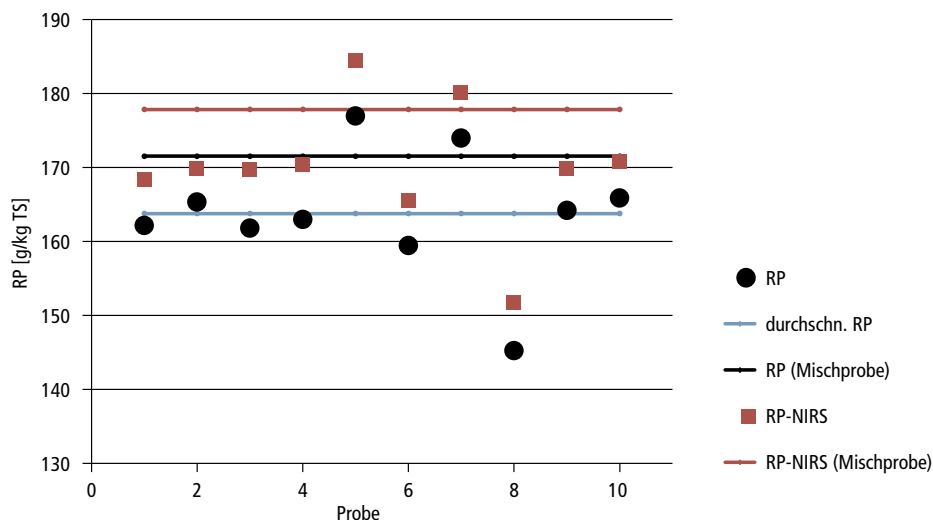


Abb. 7 | RP, bestimmt in zehn Einzelproben aus Heuballen und in einer Mischprobe einer homogenen Mischung von zehn Einzelproben. Die schwarzen Punkte und die roten Quadrate korrespondieren mit der Referenzanalyse (Dumas, $N \times 6,25$) und den NIRS-Bestimmungen der zehn Einzelproben. Die schwarze und die rote Linie korrespondieren mit den Werten der Referenzmethode bzw. den NIRS-Werten der Mischprobe. Die blaue Linie entspricht dem Durchschnitt aus den Referenzanalysen der zehn Einzelproben.

tion dieser Parameter mit der chemischen Zusammensetzung der Probe dennoch ihre Schätzung durch NIRS (Roberts *et al.* 2004).

Ein Spezialfall ist die Bestimmung von in geringen Mengen vorliegenden Substanzen wie Mineralstoffen. Obwohl in mehreren Arbeiten gute Schätzungen mit Modellen für P, Ca, K und Na nachgewiesen wurden, ist die Qualität der Modelle bei den Spurenelementen problematisch, deren Gehalte im Bereich eines mg/kg (g/kg für die ersten) liegen.

Proben mit kontrastierender Futterqualität

Abbildung 5 zeigt die Spektren nach mathematischer Vorbehandlung von zwei Proben (A und B) mit kontrastierender Futterqualität jeder Gruppe. Jedes Mal hat die mathematische Vorbehandlung die möglichen Unterschiede der Probenvorbereitung (Granulometrie) korrigiert und dabei verschiedene diskriminatorische Banden der beiden Proben hervorgehoben. Tabelle 6 gibt die Futterqualität dieser Proben wieder.

Mehrere Einzelproben oder eine Mischprobe?

Abbildung 7 zeigt die RP-Gehalte (g/kg TS) der Mischprobe sowie der zehn Einzelproben des Ballenheus. Die NIRS-Bestimmung der gleichen Proben wird ebenfalls dargestellt (Durchschnitt aus drei Probennahmen). Es lässt sich eine geringe Abweichung zwischen der Mischprobe und dem Mittelwert der zehn Einzelproben für die Referenzanalyse feststellen. Diese Abweichung – so

wie auch die individuellen Tendenzen — werden auf direktem Weg über die NIRS-Schätzungen übertragen. Trotz einer leichten Verschiebung der NIRS-Schätzungen in Relation zur Referenzanalyse (+0,6%) ist diese Methode informativer, da sie die individuelle Qualität der Heuballen beschreibt. Der Determinationskoeffizient des NIRS-Modells verbessert sich mit dem Vorschub der Repliken. Folglich steigt R^2 mit dem Gebrauch von 1, 2 und 3 Messschalen von 0,932 auf 0,9779 bzw. 0,985 (Ergebnisse nicht abgebildet).

Schlussfolgerungen

- Die NIRS ist nicht nur eine Technologie, die wegen ihrer Geschwindigkeit, der geringen Kosten und der weniger aufwändigen Vorbereitungszeit der Proben vorteilhaft, sondern auch ein Werkzeug, dessen Potenzial noch längst nicht ausgeschöpft ist.
- Die Bemühungen hinsichtlich der Entwicklung von Kalibrierungsmodellen bestehen in erster Linie im Zusammentragen repräsentativer Proben mit hochwertigen Referenzanalysen. Diese Arbeit wird bei einer routinemässigen Verwendung der NIRS belohnt.
- Um Abweichungen zu vermeiden und die Aktualisierung von Modellen bei sorten- oder klimabedingten Änderungen etc. zu ermöglichen, werden periodische Validierungen empfohlen. ■

Riassunto**Applicazione del NIRS per la determinazione dei foraggi**

Viene presentata l'applicazione del NIRS nella determinazione della composizione chimica dei foraggi attraverso modelli di previsione sviluppati presso l'Istituto di scienze della produzione animale IPA di Agroscope con valori tipici del coefficiente $R^2 > 0.96$ per parametri quali materia secca (MS), materia azotata (MA), lignina (ADForg), pareti cellulari (NDForg), cellulosa, ceneri, materia grassa, zuccheri e amidi nel fieno, nell'erba e nell'insilato d'erba, nella pianta intera di mais prima dell'insilamento e nell'insilato di mais. L'analisi con metodi chimici di un campione composto (miscela omogenea di campioni individuali) è stata positivamente sostituita dall'analisi dei campioni individuali con NIRS, che mostra le particolarità di ogni singolo campione.

Summary**Forages in the light of NIRS**

An insight into the determination of the chemical composition of forages via NIRS is presented. Predictive models developed at the Agroscope Institute for Livestock Sciences ILS show the typical values: $R^2 > 0.96$ for dry matter (DM), crude protein (CP), ADForg, NDForg, crude fibre (CF), cellulose, ash, fat, sugar and starch content in hay and grass, grass silage, green maize for silage and maize silage. The analysis of individual samples by NIRS is preferred to the analysis of a pooled sample by classical methods because NIRS shows the individual particularities of each sample.

Key words: NIRS, forage, nutritional quality.

Literatur

- Heise H. M., Winzen R., 2005. Chemometrics in Near-Infrared Spectroscopy in Near-Infrared Spectroscopy, Principles, Instruments, Applications (Ed. H.W. Siesler, Y. Ozaki, S. Kawata, H.M. Heise). 125–162.
- Hindle P. H., 2001. Historical development in Handbook of Near-Infrared Analysis (Ed. D. A. Burns and E. W. Ciurczak), 16.
- Mark H. & Workman J. Jr., 2003. Statistics in Spectroscopy. Elsevier Academic Press. 312.
- Roberts C. A., Stuth J. & Flinn P., 2004. Analysis of Forages and Feed-stuffs in Near Infrared Spectroscopy in Agriculture (Ed. C. A. Roberts, J. Workman Jr. & J. B. Reeves III), 231–267.
- Shenk J. S., Workman J. J. Jr. & Westerhaus M. O., 2001. Application of NIR to Agricultural Products in Handbook of Near-Infrared Analysis (Ed. D. A. Burns and E. W. Ciurczak), 419–474.
- Workman J. J. Jr., 2001. NIR Spectroscopy Calibration Basics in Handbook of Near-Infrared Analysis (Ed. D. A. Burns and E. W. Ciurczak), 91–128.